

# ANALYSE DE L'EXPLOITATION DES BROCHES EN UGV AERONAUTIQUE

**Côme DE CASTELBAJAC**

IRCCyN/MITIS, 1 rue de la Noë 44321 Nantes Cedex 3, cdecastelbajac@irccyn.ec-nantes.fr

**Mathieu RITOU,**

IRCCyN/Université de Nantes, 1 rue de la Noë 44321 Nantes Cedex 3, mathieu.ritou@irccyn.ec-nantes.fr

**Sylvain LAPORTE**

Société MITIS, 1 rue de la Noë 44321 Nantes Cedex 3, slaporte@mitis-engineering.fr

**Jean-Pierre IWANOW**

DASSAULT Aviation, rue Marcel Dassault 59472 Seclin, jean-pierre.iwanow@dassault-aviation.com

**Didier LE BORGNE**

AIRBUS, rue de l'Aviation 44340 Bouguenais, didier.le-borgne@airbus.com

**Benoît FURET**

IRCCyN/Université de Nantes, 1 rue de la Noë 44321 Nantes Cedex 3, benoit.furet@univ-nantes.fr

**Résumé :** *Le fraisage grande vitesse des pièces aéronautiques de grandes dimensions nécessite à la fois un taux d'enlèvement de copeaux important ainsi qu'une qualité de finition garantissant les tolérances de ces pièces à haute valeur ajoutée. Implantées sur des machines outils UGV, les électrobroches doivent supporter, sur des phases d'usinage de plusieurs heures, des sollicitations physiques importantes. Malgré les avancées technologiques, les broches apparaissent aujourd'hui comme le maillon faible des machines d'usinage à grande vitesse aéronautique. Ce papier propose un concept innovant de surveillance des broches d'UGV qui permet de suivre l'usure de celles-ci, particulièrement au niveau de leurs roulements à billes, cause principale de leurs défaillances. Pour cela des broches FISCHER ont été instrumentées de plusieurs accéléromètres, puis intégrées sur machines FOREST-LINE. Grâce aux signaux vibratoires enregistrés par un système de surveillance conçu spécifiquement et à partir d'un état de l'art sur la surveillance des roulements que nous avons réalisés, un critère vibratoire adapté au suivi de l'état des paliers des broches a été développé. De plus, les signaux et informations enregistrés lors de l'usinage par le même système de surveillance permettent de relier l'endommagement des roulements aux sollicitations subies par la broche lors de son utilisation afin d'assurer aussi une réelle surveillance du procédé en lui-même.*

**Mots clés :** surveillance d'usinage, broche UGV, usure des roulements, vibrations.

## 1 Introduction

Dans le cas spécifique de l'Usinage Grande Vitesse (UGV) de pièces aéronautiques, les électrobroches doivent supporter, sur des phases d'usinage de plusieurs heures, des sollicitations physiques importantes : vitesses de rotation de 24000 à 30000 tr/min, puissances jusqu'à 100 kW, températures jusqu'à 90°C dans le stator, vibrations... Malgré les avancées technologiques, ces broches apparaissent aujourd'hui comme le maillon faible des machines d'UGV aéronautique. De fait, leur MTTF (Mean Time To Failure) est aléatoire et très inférieur à celui annoncé par les fabricants de broches et de machines. La plupart des constats de réparation des broches mettent en cause des dégradations irréversibles d'un ou plusieurs roulements à billes, dues à un défaut de lubrification, à des chocs ou des vibrations excessives. En plus de causer des défauts de qualité sur les pièces en cours d'usinage, la casse des roulements entraîne potentiellement la dégradation d'équipements complémentaires de la broche tels que le codeur, le serre-outil, les joints tournants, le rotor ; voire la dégradation d'autres éléments de la machine (tête,...). Dans l'objectif final de mettre en place une maintenance prédictive des broches et d'augmenter leur durée de vie, il faut disposer des éléments factuels permettant d'établir le lien entre l'endommagement des roulements et les sollicitations qu'ils subissent lors de l'usinage. En outre, il existe aujourd'hui une carence d'information sur le suivi de la broche et de la machine-outil.

Acquérir de l'information au cours de l'usinage est primordial pour une meilleure compréhension des phénomènes mis en jeu lors de la coupe, un réglage optimal des paramètres opératoires ainsi qu'une surveillance efficace du bon déroulement de l'usinage. Ces données peuvent provenir soit de capteurs déjà présents dans la machine, soit de capteurs additionnels, qui permettent de mesurer par exemple la puissance [FUR 93] [ALS 04], les efforts [RIT 06], les vibrations [CHA 09], les températures [BAS 06], etc. La plupart des systèmes industriels vendus dans le commerce font intervenir un capteur additionnel et réalisent une surveillance mono-tâche focalisée sur un aspect du process [JEM 99]. Ils fonctionnent généralement par apprentissage, les seuils de détection étant définis à partir d'une mesure étalon ; ces solutions sont peu adaptées à l'usinage aéronautique où les opérations sont longues et à faible cadencement. Un premier axe d'optimisation de la surveillance d'usinage consiste en une meilleure intégration des systèmes de mesure dans la machine-outil, et notamment dans la broche [RIT 07] [GIR 10], afin de s'adapter à toute configuration d'usinage et de ne pas interférer avec le process. Un autre axe de recherche réside dans l'élaboration de systèmes multi-capteurs et connectés au directeur de commande numérique ou à l'automate. Conçus pour une surveillance globale et multitâche du process d'UGV, ils permettent d'envisager l'avènement de machines plus évoluées, capables d'adapter elles-mêmes les paramètres opératoires afin d'optimiser la qualité et la performance du process, mais aussi de suivre l'état de l'outil et de la broche [NOR 06] [RIT 08]. Pourtant, les conditions d'exploitation des broches restent très sollicitantes au niveau des roulements et on arrive aux limites technologiques. Les travaux dans ce domaine se portent alors plus particulièrement vers la thématique de la surveillance vibratoire des roulements.

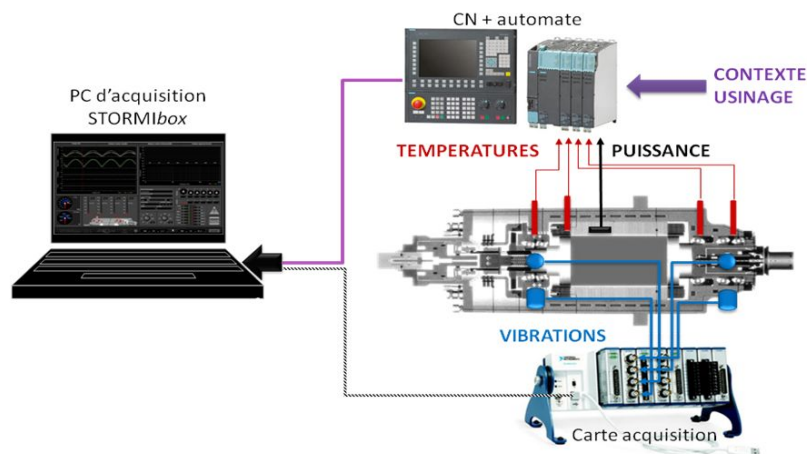
Les techniques d'analyses vibratoires sont mises en œuvre depuis longtemps pour la surveillance des roulements. On distingue les indicateurs globaux, d'une part, des méthodes d'analyse qualitative, d'autre part. Les indicateurs globaux (niveau RMS, facteur de crête, Kurtosis, etc.) sont simples à calculer et indépendants des conditions de fonctionnement [PAC 97] [DRO 09]. Mais ils n'autorisent qu'une détection tardive et décroissent lorsque les défauts se développent. Qui plus est, ils ne permettent pas de diagnostiquer l'origine des défauts. Pour plus de finesse dans l'analyse, on a alors recours à des méthodes dites qualitatives. Celles-ci reposent sur l'analyse fréquentielle et sont fondées principalement sur les fréquences caractéristiques du roulement à billes qui sont calculables théoriquement à

partir de sa géométrie et de la vitesse de rotation [HOS 06] [VAF 02] [RAI 06] [PRA 02]. Souvent assez lourdes à mettre en place, ces méthodes qualitatives nécessitent de connaître le domaine fréquentiel d'intérêt et demandent une interprétation du spectre qui peut être difficile. Par ailleurs, la plupart de ces études mettent en œuvre de faibles vitesses de rotation ( $N < 6000$  tr/min), éloignées du domaine UGV. En outre, les défauts testés sont peu représentatifs de l'endommagement réel des roulements des broches [CRA 09].

Les travaux présentés proposent un concept innovant de surveillance des broches d'UGV qui permet de suivre leur usure, au niveau des roulements à billes, et de leur équilibrage de la broche. Grâce aux signaux vibratoires enregistrés par ce système et à partir de l'état de l'art sur la surveillance des roulements, un critère vibratoire adapté au suivi de l'état des paliers des broches a été développé. Enfin, les signaux et informations enregistrés lors de l'usinage par le même système de surveillance permettent de relier l'endommagement des roulements aux sollicitations subies par la broche lors de son utilisation.

## 2 Instrumentation de la broche et de la machine-outil

Comme le montre la littérature, la mesure vibratoire au niveau des paliers de la broche est pertinente pour la surveillance de l'état des roulements, mais également des vibrations provoquées par l'usinage. Dans chacune des broches FISCHER MFW2310 suivies dans le cadre de nos travaux, quatre accéléromètres piézoélectriques sont intégrés au niveau de chaque palier. Cette intégration dans la broche permet d'éviter tout problème de reproductibilité rencontré avec les systèmes externes. En outre, on s'affranchit des perturbations de mesure dues à l'environnement extérieur (copeaux, lubrification, etc.). Pour piloter ce suivi des broches en production et enregistrer les signaux des capteurs, un système innovant de surveillance a été développé, dans la continuité de l'approche cybernétique SMMS (Smart Machining Method and System) développée à l'IRCCyN par B. FURET, S. GARNIER, M. RITOU, S. LAPORTE et G. PEIGNE [RIT 08]. Baptisé « STORMIbox » (Spindle Tool for Online Recording and Monitoring), ce système fait le lien entre le PC d'acquisition et, d'une part les capteurs via une carte d'acquisition National Instrument 9234 échantillonnée à 25 kHz, d'autre part le directeur de commande numérique via un bus de terrain (Fig. 1).



*Fig. 1 : système de surveillance STORMIbox*

La STORMIbox est installée à demeure sur la machine d'usinage et permet d'effectuer en parallèle deux types d'acquisition :

- Un enregistrement continu des données sur toute la durée de vie de la broche. Dans ce cas, les informations vibratoires sont stockées sous la forme de 4 indicateurs

calculés à partir des signaux bruts, sur la bande passante 50-3500 Hz (Tab. 1). Un exemple de l'exploitation de ces données est présenté au paragraphe 5.

- Des signatures vibratoires quotidiennes de la broche. Dans ce cas, on sauvegarde l'intégralité des signaux bruts. Le protocole associé est détaillé au paragraphe suivant.

$A_{pic}$	$A_{RMS}$	$V_{pic}$	$V_{RMS}$
$\max_N  A(i) $	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A(i) - \bar{A})^2}$	$\max_N  V(i) $	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V(i) - \bar{V})^2}$
$A(t)$ : accélération vibratoire $V(t)$ : vitesse vibratoire ; $V(t) = \int A(t)dt$			

*Tableau 1 : critères vibratoires*

A ce jour, six broches du même type ont été suivies, montées dans des centres d'usinage 5 axes FOREST-LINE et utilisées en production chez deux constructeurs aéronautiques différents, AIRBUS Nantes et DASSAULT AVIATION Seclin. L'ensemble constitue un historique de plus de deux ans de données d'usinage en production.

### 3 Protocole de suivi des broches

Pour suivre l'évolution de l'état des électrobroches, un protocole a été défini en tenant compte de ses spécificités de fonctionnement. Selon les opérations d'usinage, les conditions de coupe et les outils utilisés, la broche est utilisée à des vitesses de rotation et des puissances différentes. Ces paramètres ont un impact sur les caractéristiques géométriques de l'ensemble des contacts, des résultantes d'efforts, des moments et autres grandeurs physiques des roulements pendant l'usinage et entraînent une modification des fréquences caractéristiques des roulements. D'une part, les forces centrifuges s'exerçant sur les billes varient notablement sur l'ensemble de la plage des vitesses de travail et impliquent une modification du contact entre les billes et les bagues des roulements. D'autre part, en fonction de l'outil utilisé et de ses paramètres de coupe ( $a_e$ ,  $a_p$ ,  $N$ ,  $V_f$ ), les efforts d'usinage ainsi que la puissance de la broche varient, influant sur les dilatations thermiques des différentes parties mécaniques de la broche et donc sur la géométrie du contact billes/bagues. Enfin, la longueur, la rigidité, l'attachement et la vitesse de rotation étant variables selon les outils, les modes de vibration de l'ensemble {outil ; porte-outil ; rotor} sont modifiées en fonction de ces paramètres [RAN 07]. A la différence de la surveillance classique effectuée sur d'autres machines tournantes dont les conditions d'utilisation sont quasi constantes (compresseurs, turbines, etc.), les roulements des broches d'UGV travaillent dans des conditions extrêmement variables selon les opérations d'usinage.

Une surveillance des roulements des broches d'UGV effectuée aléatoirement pendant l'usinage n'est donc pas pertinente : il est nécessaire de mettre en œuvre un protocole particulier, adapté aux paramètres d'utilisation des broches d'UGV et dont les conditions sont les mêmes quelle que soit la date à laquelle il est mis en œuvre. Celui-ci fait intervenir différents paliers de vitesses, caractéristiques des vitesses de rotation principales des outils utilisés en production. Il est réalisé sur les machines en dehors des phases d'usinage et après un cycle de préchauffage de la broche ; l'excitation est créée par un outil dont l'équilibrage est maîtrisé. Ce dispositif permet donc d'analyser le contenu spectral de la signature de la broche pour tout un panel de fréquences de rotation en s'affranchissant au maximum de l'influence des variations de température, précharge et autres paramètres variables au cours de l'usinage. Ainsi, seul l'état de la broche est identifié.

#### 4 Critères de l'endommagement des paliers de broche

Il est compliqué, voire impossible, de surveiller indépendamment les différents roulements, et ce pour deux raisons. D'une part, les vibrations se propagent facilement dans l'ensemble mécanique compact qu'est la broche (montage en tandem des roulements). D'autre part, les fréquences caractéristiques théoriques des roulements des broches que nous suivons sont semblables (Tab. 2) et susceptibles de varier légèrement d'un roulement à un autre et en fonction des précharges réelles. Enfin, cette finesse d'analyse n'est pas nécessaire pour notre étude car la casse d'un des roulements de la broche entraîne de facto la panne de cette dernière. On s'attachera plutôt à distinguer les vibrations au palier avant et au palier arrière.

	Calcul théorique	Roulement avant	Roulement arrière
BPFO (bague extérieure)	$\frac{N_b}{2} \left( 1 - \frac{D_b}{D_m} \cos \alpha \right) * N$	11,30 * N	11,34 * N
BPFI (bague intérieure)	$\frac{N_b}{2} \left( 1 + \frac{D_b}{D_m} \cos \alpha \right) * N$	13,70 * N	13,66 * N
BSF (billes)	$\frac{1}{2} \left( 1 + \frac{D_b}{D_m} \cos \alpha \right) * N$	4,68 * N	4,84 * N
FTF (cage)	$\frac{1}{2} \left( 1 - \frac{D_b}{D_m} \cos \alpha \right) * N$	0,45 * N	0,45 * N
$N_b$ : nombre de billes du roulement $D_b$ : diamètre des billes $D_m$ : diamètre moyen du roulement $\alpha$ : angle de contact $N$ : vitesse de rotation			

Tab. 2 : Fréquences caractéristiques théoriques des roulements de la broche.

Le suivi de chaque fréquence caractéristique pour chaque roulement est donc complexe à mettre en œuvre, surtout dans l'objectif d'automatiser une surveillance des broches de ce type. La surveillance par bandes spectrales fines est la plus adaptée pour la détection de l'écaillage des roulements de broche car elle permet de suivre l'évolution des fréquences caractéristiques des roulements tout en prenant en compte leur variabilité potentielle, au cours du temps. A partir des signatures quotidiennes de la broche, on applique au signal temporel brut un filtre passe-bande centré sur chacune des fréquences théoriques et dont les bornes tiennent compte à la fois des dérives potentielles de ces fréquences ainsi que fréquences « parasites » avoisinantes (principalement les harmoniques de la fréquence de rotation). Un intervalle de 5% est généralement sélectionné. On calcule ensuite la valeur efficace du signal ainsi filtré (Fig. 2).

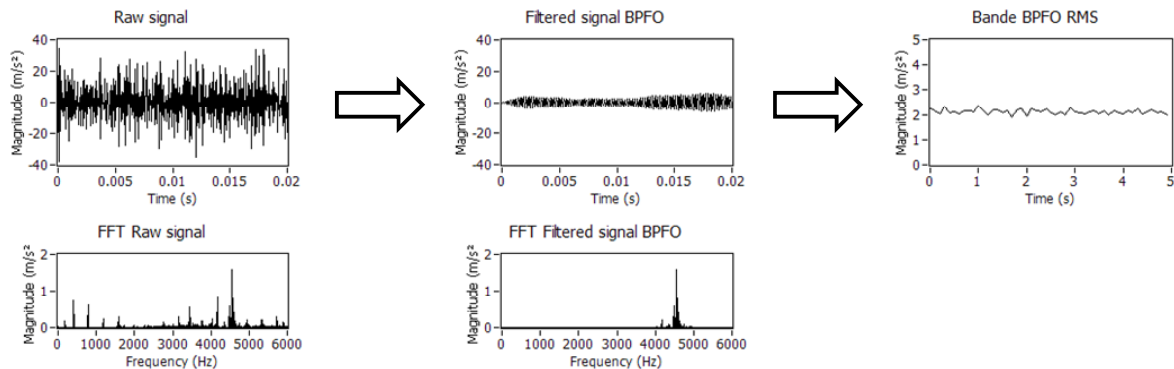
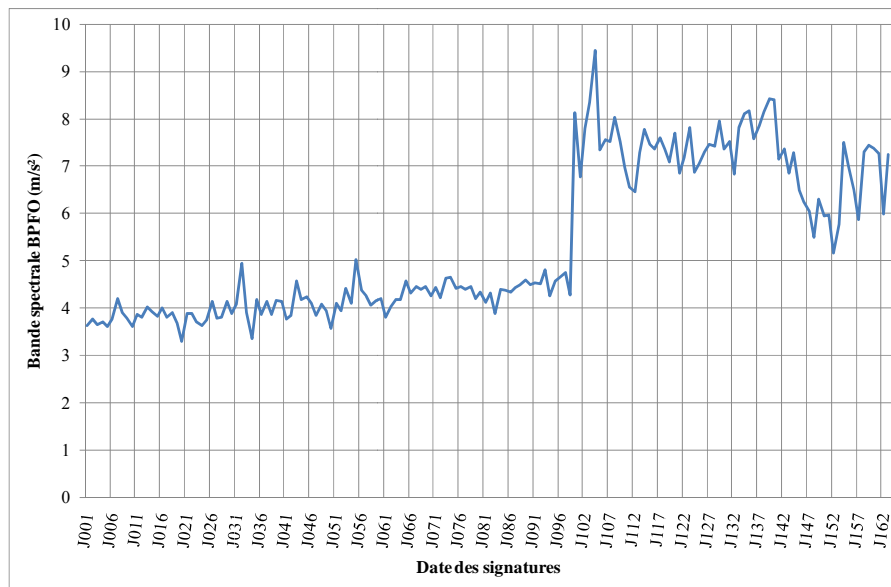


Figure 2 : Traitement du signal par bandes spectrales fines.

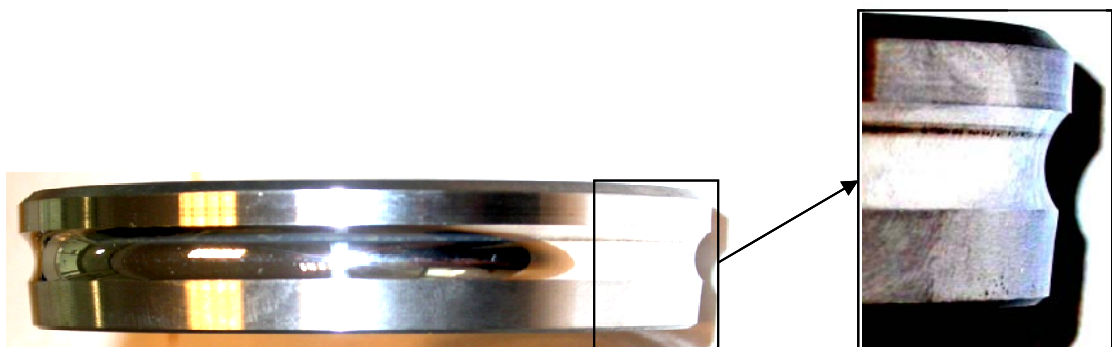
Grâce à la surveillance en continu des broches par la STORMIbox, il est possible de suivre quotidiennement l'évolution de ce critère. Le graphe de la Fig. 3 présente l'évolution

jour après jour de la bande spectrale à BPFO pour le palier avant de la broche à une vitesse de broche de 17500 tr/min.



*Fig. 3 : Evolution de la bande spectrale à BPFO – palier avant de la broche*

Sur cet exemple, on note, entre les signatures des dates J099 et J100, une augmentation brutale de la valeur de ce critère, témoin d'un écaillage de la piste de la bague extérieure des roulements du palier avant. Cet endommagement a pu être constaté sur les pistes des bagues des roulements du palier avant suite au démontage de la broche (Fig. 4).



*Fig. 4 : bague d'un roulement écaillé*

Le suivi de ce critère vibratoire est donc pertinent dans le cadre de la compréhension des phénomènes de dégradation des broches ; en effet, l'apparition d'un écaillage sur la piste d'un roulement fragilise ce dernier, accélère son usure et va engendrer sa défaillance prématurée. Surtout, il est nécessaire de comprendre pourquoi cet écaillage est apparu de façon à pouvoir, à terme, optimiser le procédé et améliorer la durée de vie des broches.

## **5 Etablissement du lien entre les sollicitations en usinage et l'endommagement des roulements**

Pour identifier l'origine de ce défaut, il faut être capable de retracer les sollicitations subies par la broche lors de son utilisation. Les premiers constats disponibles sont ceux de l'exploitant industriel qui recense les casses outils intervenues lors de l'usinage. En poursuivant avec l'exemple présenté au paragraphe précédent, la casse d'un outil a effectivement été relevée entre les signatures J099 et J100, soit juste avant l'augmentation du critère de bande spectrale BPFO. Toutefois, plusieurs bris d'outils ont eu lieu sur l'ensemble

de la vie de cette broche, sans pour autant avoir des répercussions aussi importantes sur l'endommagement des roulements. Il faut donc approfondir l'analyse afin d'évaluer les sollicitations responsables de la dégradation.

Le système STORMIbox enregistrant en continu les données vibratoires ainsi que le contexte d'usinage, il permet donc une analyse plus fine. En ce sens, des moyens d'analyses spécifiques ont été développés pour le traitement des données de surveillance d'usinage et autorisent une traçabilité précise de l'historique de production. Dans le cas qui nous intéresse, il est possible d'identifier le programme mis en cause : il s'agit d'un usinage de six pièces identiques sur une palette, faisant intervenir six outils différents. On calcule alors la répartition statistique des vibrations au cours du déroulement de l'usinage (Fig. 5) : les signaux stockés sous forme de critères dans la STORMIbox (cf. paragraphe 2) sont extraits puis découpés en bandes temporelles de période constante sur lesquelles est calculée la répartition statistique des niveaux de vibrations, affichée sous forme de code couleur. Sur ce graphe, on peut identifier les six opérations d'usinage, correspondant aux six outils utilisés et notées de T1 à T6. Pour chacune de ces opérations, on observe six profils semblables de répartition des vibrations (image 1 Fig. 5), comme lors de l'opération d'ébauche T1 dont les trajectoires sont représentées sur l'image 2 de la Fig. 5. L'incident d'usinage ressort clairement ; de fait, lors de l'opération de finition T4 (image 3, Fig. 5), trois des six pièces présentes sur la palette ont été usinées pendant près de 50 minutes avec des niveaux vibratoires  $V_{RMS}$  atteignant jusqu'à 11 mm/s (en violet sur le graphe), le seuil vibratoire préconisé par le constructeur de la broche étant de 6 mm/s.

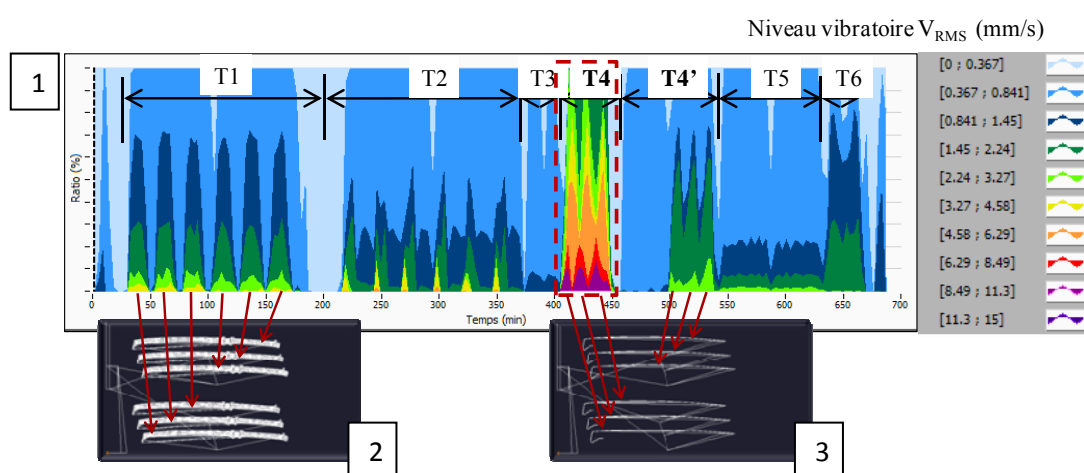


Figure 5 : Analyse statistique vibratoire – palier avant de la broche

La dernière étape d'analyse consiste à étudier les signaux vibratoires temporels enregistrés lors de cet usinage. Les deux graphes de la Fig. 6 montrent respectivement l'instant du bris d'outil ainsi qu'un exemple de l'allure générale des signaux délivrés par les accéléromètres après l'incident. Sur chacun des deux graphes, la période est d'une minute, soit 30s avant et après l'instant sélectionné.

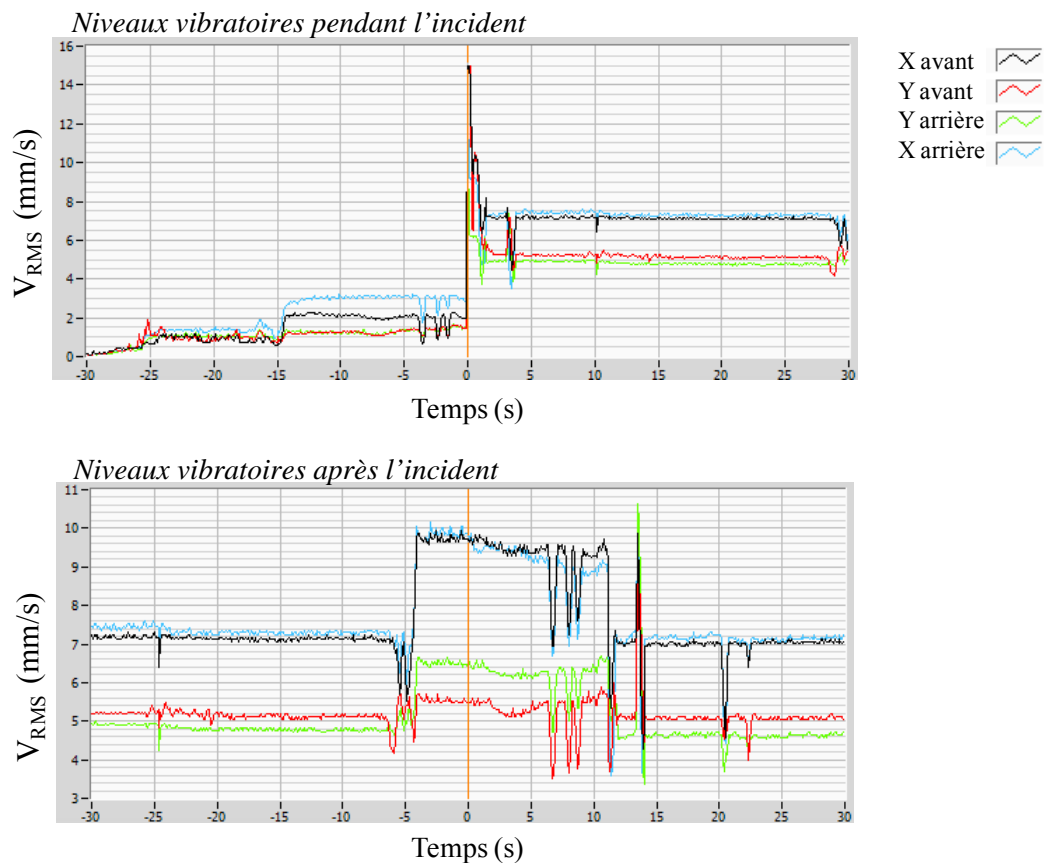


Fig 6 : signaux temporels vibratoires

On peut observer que le choc provoqué par le bris (graphe du haut) provoque un niveau de vibration très élevé mais sur une durée très courte : le niveau vibratoire  $V_{RMS}$  atteint 15 mm/s pendant 0,2 s. De plus, pour le reste de l'usinage avec cet outil ébréché, les niveaux vibratoires enregistrés par les capteurs orientés selon Y sont en moyenne deux fois inférieurs à ceux enregistrés par les capteurs X ; en fonction de la direction d'usinage et de l'engagement de l'outil dans la matière, les sollicitations vibratoires sont plus ou moins importantes selon la position angulaire des accéléromètres. Ainsi, la surveillance à l'aide d'un unique capteur selon Y n'aurait pas permis la détection de l'incident. Cet exemple montre donc la pertinence d'une surveillance multi-capteurs.

Grâce au suivi quotidien de l'état de la broche et l'enregistrement continu des données du process, il est donc possible de détecter l'écaillage d'un ou plusieurs des roulements de la broche et de faire le lien avec les sollicitations subies lors de l'usinage. Ces premiers résultats permettent d'envisager des systèmes optimisés de surveillance d'usinage.

## 6 Conclusion

L'objectif des travaux était de faire le lien entre l'état de la broche et les sollicitations. Ce papier présente une partie des travaux qui ont permis d'aboutir à la création d'un système innovant de surveillance de l'usinage et de la santé des paliers des broches d'UGV. Ce système baptisé *STORMibox*, permet d'enregistrer les sollicitations vibratoires ainsi que le contexte d'usinage en temps réel et sur toute la durée de vie de la broche. De façon à suivre finement l'état des roulements des broches, un protocole spécifique a été défini et mis en œuvre quotidiennement sur chaque machine suivie. L'analyse vibratoire par bandes spectrales centrées autour des fréquences caractéristiques des roulements s'est révélée pertinente pour la détection d'écaillage des pistes de roulement et a été validée en conditions industrielles. Enfin, le système de surveillance *STORMibox* permet d'établir un lien entre



l'endommagement des roulements et les sollicitations subies par la broche en usinage. Dans la suite des travaux, il sera important de consolider les critères et méthodes présentés dans cet article par leur mise en œuvre sur les autres bases de données des broches suivies par la STORMIbox. En plus d'une simple détection de l'écaillage des roulements, il est nécessaire de disposer d'un critère discriminant de l'état des paliers autorisant une maintenance prédictive de celles-ci. Enfin, la capitalisation d'informations dont nous disposons grâce à la STORMIbox permet d'envisager une nouvelle approche de la surveillance d'usinage et une optimisation du process.

Une partie des développements et résultats présentés dans cet article font partie des travaux menés dans le cadre du programme de recherche UsinAE. Ce projet est un projet FUI de la DGCIS du Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi, labellisé par le pôle de compétitivité EMC2, porté par le groupe Europe Technologies et constitué des partenaires suivants : Dassault Aviation, Airbus, Forest-Liné, Dufieux, PCI, Précise-Fischer, S2M, EADS-IW, Synervia et IRCCyN/Université de Nantes, ainsi que des partenaires associés Aérolia, Unil-Opal et Mitis.

## Références

- [FUR 93] B.FURET, M.F.LUCAS, N.ROBLIN, 1993, *Signal processing techniques to the diagnosis of milling tool wear*, Advances in Industrial Engineering, Production Research, Vol. 17, p151-158.
- [ALS 04] F.A. AL-SULAIMAN, M.A. BASEER, A.K. SHEICK, 2004, *Use of electrical power for online monitoring of tool condition*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 166, Issue 3, Pages 364-371.
- [RIT 06] M. RITOU, S. GARNIER, B. FURET, J.Y. HASCOET, 2006, *A new versatile in-process monitoring system for milling*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 46, Issue 15, Pages 2026-2035.
- [CHA 09] C.F. CHANG, J.J. CHEN, 2009, *Vibration monitoring of motorized spindles using spectral analysis techniques*, Mechatronics, Volume 19, Issue 5, Pages 726-734.
- [BAS 06] A. BASTI, T. OBIKAWA, J. SHINUZOKA, 2006, *Tools with built-in thin film thermocouple sensors for monitoring cutting temperature*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 47, Issue 5, Pages 793-798.
- [JEM 99] K. JEMELINIAK, 1999, *Commercial Tool Condition Monitoring Systems*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology.
- [RIT 07] M. RITOU, S. LAPORTE, G. PEIGNE, B. FURET, S. GARNIER, J.Y. HASCOET, 2007, *Instrumentation de la broche par des capteurs inductifs : application à la mesure d'effort et à l'étude du comportement des broches UGV*, 10<sup>e</sup> colloque national AIP PRIMECA, La Plagne, France.
- [GIR 10] F. GIRARDIN, D. REMOND, J.F. RIGAL, 2010, *Tool wear detection in milling an original approach with a non dedicated sensor*, Mechanical Systems and Signal Processing.
- [NOR 06] P. NORMAN, *Advanced process monitoring and analysis of machining*, ISSN 1402-1757 / ISRN LTU-LIC--06/38--SE / NR 2006:38.
- [PAC 97] C. PACHAUD, R. SALVETAT, C. FRAY, 1997, *Crest factor and Kurtosis contributions to identify defects inducing periodical impulsive forces*, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 11, Issue 6, Pages 903-916.
- [DRO 09] J.P. DRON, L. RASOLOFONDRAIBE, F. BOLAERS, X. CHIEMENTIN, O. COUSINARD, 2009, *Amélioration de la détection d'écaillages de roulements par débruitage des signaux vibratoires*, Mécaniques & Industries, Volume 9, Numéro 5, Septembre-Octobre 2008, Pages 459-468.

- [HOS 06] T. HOSHI, 2006, *Damage monitoring of ball bearing*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 55, Issue 1, Pages 427-430.
- [VAF 02] S. VAFAEI, H. RAHNEJAT, R. AINI, 2002, *Vibration monitoring of high speed spindles using spectral analysis technique*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 42, Issue 11, Pages 1223-1234.
- [RAI 06] V.K. RAI, A.R. MOHANTY, 2006, *Bearing fault diagnosis using FFT of intrinsic mode functions in Hilbert-Huang transform*, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 21, Issue 6, Pages 2607-2615.
- [PRA 02] S. PRABHAKAR, A.R. MOHANTY, A.S. SEKHAR, 2002, *Application of discrete wavelet transform for detection of ball bearing race faults*, Tribology International, Volume 35, Issue 12, Pages 793-800.
- [CRA 09] M. CRAIG, T.J. HARVEY, R.J.K. WOOD, K. MASUDA, M. KAWABATA, H.E.G. POWRIE, 2009, *Advanced condition monitoring of tapered roller bearings, Part 1*, Tribology International, Volume 42, Issues 11-12, Pages 1846-1856.
- [RIT 08] M. RITOU, S. GARNIER, B. HAVETTE, B. FURET, 5 juin 2008, *Le pilotage intelligent du process d'usinage : l'approche S.M.M.S. (Smart Machining Method & System)*, 5<sup>e</sup> Assises Machines et Usinage à Grande Vitesse, Nantes, France.
- [RAN 07] M. RANTATALO, J.O. AIDANPAA, B. GORANSSON, P. NORMAN, 2007, *Milling machine spindle analysis*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 47, Issues 7-8, Pages 1034-1045.